



⑮ **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT**

⑫ **Patentschrift**
⑩ **DE 197 38 179 C 1**

⑤① Int. Cl.⁶:
G 01 B 11/24
G 01 B 11/03
G 01 B 11/30

⑲ Aktenzeichen: 197 38 179.0-52
⑳ Anmeldetag: 2. 9. 97
㉑ Offenlegungstag: -
㉒ Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 12. 5. 99

DE 197 38 179 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦① **Patentinhaber:**
Mähner, Bernward, 83607 Holzkirchen, DE

⑦② **Erfinder:**
gleich Patentinhaber

⑤⑤ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 41 20 115 A1

NL-Z: LEHMANN, M.: Optimization of wavefield
intensities in phase-shifting speckle inter-
ferometry, in: Optics Communications 118 (1995)
199-206;

⑤④ **Verfahren zur dreidimensionalen optischen Vermessung von Objektpunkten**

⑤⑤ Zur hochgenauen, dreidimensionalen Formerfassung werden Triangulationsverfahren eingesetzt, welche mit einem Streifenprojektor und einer Videokamera arbeiten. Während der gesamten Aufnahmezeit, die benötigt wird, um alle zu einer Messung gehörenden Streifenmuster aufzunehmen, muß die gesamte zu vermessende Szenerie unbeweglich sein. Es ist daher zweckmäßig, die Anzahl der zu projizierenden Streifenbilder zu minimieren, um die Aufnahmezeit zu verkürzen.

Aus der Projektion von strukturfreien Lichtmustern mittels eines Projektors, der auch zur Projektion von Linien-
gittern dient, wird die Hintergrundintensität ermittelt. Zur Berechnung des Phasenwinkels sind für jede benötigte Periodenlänge nur zwei Gitterprojektionen nötig. In Kombination mit dem Verfahren nach dem codierten Lichtansatz oder durch Verwendung unterschiedlicher Periodenlängen läßt sich der absolute Phasenwinkel bestimmen, wobei weniger Streifenmuster projiziert werden müssen als bei den bisherigen Verfahren.

Durch die verkleinerte Aufnahmezeit wird der Einsatz unter kritischen Bedingungen erleichtert. Solche sind gegeben, falls das aufzunehmende Objekt nur schwerlich in absoluter Ruhe verharrt, so beispielsweise bei der Messung an lebenden Personen.

DE 197 38 179 C 1

BEST AVAILABLE COPY BEST AVAILABLE COPY

Es ist bekannt, daß zur hochgenauen dreidimensionalen Formenerfassung Triangulationsverfahren eingesetzt werden, welche mit einem Streifenprojektor und einer Film- oder Videokamera arbeiten. Dieses Meßprinzip bietet den Vorteil, daß eine flächenhafte Auswertung möglich ist, nämlich an allen Oberflächenpunkten eines Objektes, die sowohl vom Projektor beleuchtet als auch von der Kamera beobachtet werden.

Um eine eindeutige Identifikation der projizierten Streifen zu ermöglichen, ist es erforderlich, eine Reihe unterschiedlicher Streifenmuster nacheinander zu projizieren und mit der Kamera aufzunehmen. Hierzu sind verschiedene Verfahren bekannt, so z. B. das hierarchische Phasenshiftverfahren, das z. B. im Digitalisiersystem OptoShape der Fa. Massen (Am Seerhein 8, 78467 Konstanz) verwendet wird, der codierte Lichtansatz (T. G. Stahs, F. M. Wahl, "Close Range Photogrammetry Meets Machine Vision", SPIE Vol. 1395 (1990) S. 496-503 sowie "Kurzbeschreibung I.C.D. 320" zum Projektor Typ I.C.D. 320 der Fa. ABW, Gutenbergstraße 9, D-72636 Frickenhausen) oder das kombinierte CLA-Phasenshift-Verfahren (Patentschrift DE 41 20 115 C2). Bei diesen Techniken wird eine hohe Auflösung durch das aus der interferometrischen Meßtechnik stammende Phasenshiftverfahren erzielt. Beim Phasenshiftverfahren wird durch Projektion phasenverschobener sinusförmiger Wellenfronten die Berechnung des Phasenwinkels für jeden Punkt der untersuchten Streifen- bzw. Interferenzbilder ermöglicht. Hierzu werden für jede der verwendeten Perioden- bzw. Wellenlängen jeweils mindestens 3 phasenverschobene Wellenfronten benötigt, da Hintergrundintensität, Intensitätsamplitude und Phasenwinkel bestimmt werden müssen (W. Osten, "Digitale Verarbeitung und Auswertung von Interferenzbildern", Kap. 6, Akademie Verlag ISBN 3-05-501294-1).

Das Phasenshiftverfahren besitzt den Nachteil, daß für jede der verwendeten Perioden- bzw. Wellenlängen mindestens 3 Bilder benötigt werden. Beim Einsatz des Phasenshiftverfahrens in Kombination mit einem programmierbaren Liniengitter, z. B. in Form eines I.C.D.-Panels, ergibt sich ferner der Nachteil, daß zur Erzeugung der Sinusgitter, welche um ganzzahlige Vielfache von 120° verschiebbar sein müssen, für die kürzeste darstellbare Periode jeweils 6 Linien zu einer Sinuswellenperiode kombiniert werden, da der 120° Phasenshift durch Versetzen des Streifenmusters um 2 Linien erfolgt. Aus diesem Grunde wird in der Praxis meistens der 4er Phasenshift verwendet, bei dem eine Periode durch Kombination von nur 4 Linien erzeugt wird und der 90° Phasenshift durch Versetzen des Streifenmusters um eine Linie durchgeführt wird. Hierdurch erhält man eine höhere Streifendichte und damit Auflösung, benötigt aber insgesamt 4 Gitterprojektionen um den Phasenwinkel zu berechnen.

Während der gesamten Aufnahmezeit, die benötigt wird, um alle Lichtmuster aufzunehmen, muß die gesamte zu vermessende Szenerie unbeweglich sein, da sonst die mit der Kamera aufgenommenen Bilder nicht korrelieren. Dies ist insbesondere dann ein Problem, falls das aufzunehmende Objekt nur schwerlich in absoluter Ruhe verharrt, so wie beispielsweise bei der Messung an lebenden Personen. Es ist daher zweckmäßig, die Anzahl der zu projizierenden Lichtmuster zu minimieren und damit die Aufnahmezeit zu verkürzen.

Die Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren anzugeben, das zur hochauflösenden Vermessung von Objekten mittels projizierter Lichtmuster geeignet ist und das eine in der Auflösung gleichwertige und in der Aufnahmezeit überlegene Alternative zu den obengenannten Verfahren darstellt. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den jeweiligen Unteransprüchen angegeben.

Zur Berechnung des Phasenwinkels für jeden Bildpunkt der beobachtenden Kamera wird eine Projektionseinheit mit programmierbarem oder mechanisch verstellbarem Gitter verwendet. Erfindungsgemäß ist das Gitter so ausgebildet, daß entweder mindestens zwei verschiedene Lichtflächen erzeugt bzw. projiziert werden können, die jeweils eine gleichmäßige nicht durch Linien oder sonstige Strukturen durchgezogene Intensitätsverteilung aufweisen, die der Intensitätsverteilung einer mit der gleichen Projektionseinheit erzeugten Gitterprojektion mit sinusförmiger Intensitätsverteilung an Orten mit konstantem Phasenwinkel bekannter oder berechenbarer Größe entspricht. Oder das Gitter ist so ausgebildet, daß eine strukturfreie Lichtfläche projiziert werden kann, deren Intensitätsverteilung punktwweise genau dem Mittelwert zwischen maximaler und minimaler Intensität der mit der gleichen Projektionseinheit erzeugten Gitterprojektionen mit sinusförmiger Intensitätsverteilung entspricht. Die mit strukturfreien Lichtflächenprojektionen erzeugten und mit der Kamera aufgenommenen Abbildungen werden im Folgenden Konstantphasenbilder genannt, da der an jedem Bildpunkt vorliegende Phasenwinkel konstant ist.

Erfindungsgemäß werden die Konstantphasenbilder zur Berechnung der Hintergrundintensität oder der Intensitätsamplitude in den Abbildungen der mit der gleichen Projektionseinheit erzeugten Gitterprojektionen mit sinusförmiger Intensitätsverteilung verwendet. Es werden somit von den drei unbekannten Größen Hintergrundintensität, Intensitätsamplitude und Phasenwinkel, welche, wie fängangs erwähnt, bei sinusförmiger Intensitätsverteilung zu bestimmen sind, entweder Hintergrundintensität oder Intensitätsamplitude oder Hintergrundintensität und Intensitätsamplitude aus Konstantphasenbildern berechnet. Die so berechnete Hintergrundintensität oder Intensitätsamplitude wird erfindungsgemäß dazu verwendet, um aus den Abbildungen der Gitterprojektionen mit sinusförmiger Intensitätsverteilung punktwweise den Phasenwinkel zu berechnen.

Formelmäßig ergeben sich dabei die folgenden Zusammenhänge:

Es gilt für die Intensität $I_{S(x,y)}$ eines Bildpunktes an den Bildkoordinaten (x, y) bei sinusförmiger Intensitätsverteilung:

$$I_{S(x,y)} = I_{A(x,y)} \cdot \sin(\varphi_{1(x,y)} + I_{H(x,y)})$$

mit:

$I_{A(x,y)}$: Intensitätsamplitude

$\varphi_{1(x,y)}$: Phasenwinkel

$I_{H(x,y)}$: Hintergrundintensität

Seien $I_{1(x,y)}$ und $I_{2(x,y)}$ die in den Konstantphasenbildern am Bildpunkt (x, y) enthaltenen Intensitäten, welche den ortsunabhängigen Phasenwinkeln φ_1 bzw. φ_2 entsprechen.

Unter Verwendung des Ansatzes:

$$I_{1(x,y)} = I_{A(x,y)} \cdot \sin \varphi_1 + I_{H(x,y)}$$

$$I_{2(x,y)} = I_{A(x,y)} \cdot \sin \varphi_2 + I_{H(x,y)}$$

ergibt sich die Hintergrundintensität $I_{H(x,y)}$ zu:

$$I_{H(x,y)} = \frac{I_{1(x,y)} - \sin \varphi_1 / \sin \varphi_2 * I_{2(x,y)}}{1 - \sin \varphi_1 / \sin \varphi_2}$$

und die Intensitätsamplitude $I_{A(x,y)}$ zu:

$$I_{A(x,y)} = \frac{I_{1(x,y)} - I_{2(x,y)}}{\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2}$$

Die Projektionseinheit ist vorteilhafterweise konstruktiv so ausgebildet, daß ein Sinusgitter sowie ein in Intensitätsamplitude und Periodenlänge mit dem Sinusgitter identisches aber um $\pi/2$ phasenverschobenes Gitter projiziert werden kann.

Zur Berechnung des Phasenwinkels für jeden Bildpunkt der Kamera werden vorteilhafterweise die Abbildungen der Projektionen eines Sinusgitters und des hierzu passenden Cosinusgitters, also eines Gitters das gegenüber dem Sinusgitter um $\pi/2$ phasenverschoben ist, verwendet.

Der Phasenwinkel $\varphi_{(x,y)}$ am Bildpunkt (x, y) errechnet sich dann wie folgt:

Mit:

$$I_{C(x,y)} = I_{A(x,y)} \cdot \sin(\varphi_{(x,y)} + \pi/2) + I_{H(x,y)} = I_{A(x,y)} \cdot \cos(\varphi_{(x,y)}) + I_{H(x,y)}$$

gilt:

$$\varphi_{(x,y)} = \arctan \frac{I_{S(x,y)} - I_{H(x,y)}}{I_{C(x,y)} - I_{H(x,y)}}$$

Es ist nun offensichtlich, daß zur Bestimmung des Phasenwinkels $\varphi_{(x,y)}$ nur zwei Gitterprojektionen mit sinusförmiger Intensitätsverteilung erforderlich sind.

Da der Phasenwinkel $\varphi_{(x,y)}$ durch die Arcustangensfunktion bestimmt wird, ist er 2π moduliert, so daß um ganzzahlige Vielfache von 2π verschiedene Phasenwerte nicht unterschieden werden können. Zur Berechnung der absoluten Phasenwinkel, d. h. zur Bestimmung des $n \cdot 2\pi$ Offsets eines Phasenwinkels, wird das Verfahren deshalb vorteilhafterweise mit dem Verfahren des codierten Lichtansatzes kombiniert, oder durch Verwendung unterschiedlicher Periodenlängen in den Sinus/Cosinus Gitterpaaren eine Serie von Phasenbildern berechnet, die eine Berechnung des absoluten Phasenwinkels zuläßt. In beiden Fällen lassen sich hierbei gegenüber der Verwendung des Phasenshiftverfahrens Projektionen bzw. Bildaufnahmen einsparen.

Im ersten Fall führt man hierzu vorteilhafterweise die zur Auswertung der Streifenbilder des codierten Lichtansatzes erforderliche Identifikation heller und dunkler Linien auf Basis des Hintergrundintensitätsbildes durch, womit sich die Erzeugung des ansonsten erforderlichen dynamischen Schwellwertbildes zur Binarisierung der Streifenmuster erübrigt.

Im zweiten Fall benötigt man zur Phasenberechnung nur zwei Gitterprojektionen pro verwendeter Periodenlänge, da das nach obigen Verfahren erzeugte Hintergrundintensitätsbild für alle Periodenlängen gültig ist.

Da sich die nach dem hier beschriebenen neuen Verfahren berechneten Phasenbilder im Ergebnis nicht von den mittels des bekannten Phasenshiftverfahrens erzeugten Phasenbildern unterscheiden, muß die Verrechnung von Phasenbild mit Bildern des codierten Lichtansatzes bzw. die Verrechnung von Phasenbildern unterschiedlicher Periodenlänge zur Bestimmung des absoluten Phasenwinkels hier nicht weiter erläutern werden.

Im folgenden seien zwei Ausführungsbeispiele aufgeführt:

Ein Gitter mit den geforderten Eigenschaften erhält man durch Verwendung eines programmierbaren LCD-Panels mit Linien- oder Punktelementen in der Projektionseinheit (LCD-Projektor).

Wird nun ein Bild bei voll durchlässigem LCD-Panel und ein Bild bei voll abgedunkeltem LCD-Panel aufgenommen, so erhält man die obere und die untere Einhüllende zu sämtlichen mit dem LCD-Gitter projizierbaren Streifenmustern, unter der Voraussetzung, daß zur Erzeugung der Streifenmuster ebenfalls die hellsten und dunkelsten Linien, welche mit dem LCD-Panel erzeugbar sind, verwendet werden.

Es gilt dann für die ortsunabhängigen Phasenwinkel $\varphi_1 = 90^\circ$ und $\varphi_2 = 270^\circ$ und somit für die Hintergrundintensität $I_{H(x,y)}$:

$$I_1(x, y) + I_2(x, y)$$

$$I_H(x, y) = \frac{\quad}{2}$$

2

Die dabei entstehenden Verhältnisse zeigt Fig. 1. Sie zeigt einen Schnitt durch die Abbildungsebene des Projektionsfeldes senkrecht zur Orientierung der Streifen. Dabei ist die Intensität I über der Strecke s aufgetragen. Kurve 1 zeigt den Intensitätsverlauf bei Projektion mit voll durchlässigem Gitter (Konstantphasenwinkel $\varphi_1 = 90^\circ$). Kurve 2 den Intensitätsverlauf bei voll abgedunkeltem Gitter (Konstantphasenwinkel $\varphi_2 = 270^\circ$). Kurve 3 die resultierende Hintergrundintensität I_H und Kurve 4 den Intensitätsverlauf bei Projektion eines Sinusgitters.

Wird hingegen ein Bild aufgenommen, bei welchem die durch die LCD-Elemente hervorgerufene Abdunkelung genau dem Mittel zwischen maximaler Helligkeit bei voll durchlässigem LCD-Panel und minimaler Helligkeit bei voll abgedunkeltem LCD-Panel entspricht, so erhält man ein Konstantphasenbild zum Winkel $\varphi_1 = 0^\circ$ und somit für die Hintergrundintensität $I_{H(x,y)}$:

$$I_{H(x,y)} = I_{H(x,y)}$$

d. h. man erhält so direkt aus einem Bild die Hintergrundintensität. Diese Vorgehensweise erfordert allerdings ein Gitter welches Graustufen darstellen kann und nicht nur binäre hell/dunkel Muster. Die dabei entstehenden Verhältnisse zeigt Fig. 2. Sie zeigt wiederum einen Schnitt durch die Abbildungsebene des Projektionsfeldes senkrecht zur Orientierung der Streifen. Es ist die Intensität I über der Strecke s aufgetragen. Kurve 5 zeigt den Intensitätsverlauf bei halb durchlässigem Gitter (Konstantphasenwinkel $\varphi_1 = 0^\circ$), der identisch ist mit dem Intensitätsverlauf der Hintergrundintensität I_H , und Kurve 6 den Intensitätsverlauf bei Projektion eines Sinusgitters.

Patentansprüche

1. Verfahren zur optischen Vermessung räumlicher Koordinaten von Objektpunkten, bei dem mittels eines Projektors Lichtmuster auf das zu vermessende Objekt projiziert werden, Abbildungen dieser Lichtmuster auf dem Objekt mittels einer Kamera aufgenommen werden und aus diesen Abbildungen über ein Triangulationsverfahren die Oberflächenkontur des Objektes berechnet wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß Lichtflächen auf das zu vermessende Objekt projiziert und aufgenommen werden, deren jeweilige Intensitätsverteilung der Intensitätsverteilung einer mit der gleichen Projektioneinheit erzeugten Gitterprojektion mit sinusförmiger Intensitätsverteilung an Orten mit konstantem Phasenwinkel von bekannter oder berechenbarer Größe entspricht, daß die Abbildungen dieser Lichtflächen zur punktweisen Berechnung der Hintergrundintensität oder der Intensitätsamplitude in den Abbildungen der Gitterprojektionen mit sinusförmiger Intensitätsverteilung verwendet werden und daß die so berechnete Hintergrundintensität oder Intensitätsamplitude dazu verwendet wird, um aus den Abbildungen von Gitterprojektionen mit sinusförmiger Intensitätsverteilung punktweise den Phasenwinkel zu berechnen.

2. Verfahren nach Patentanspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß die Hintergrundintensität oder die Intensitätsamplitude punktweise aus den Projektionen der oberen und der unteren Einhüllenden der Gitterprojektionen mit sinusförmiger Intensitätsverteilung ermittelt wird.

3. Verfahren nach Patentanspruch 1 dadurch gekennzeichnet, daß die Hintergrundintensität punktweise aus der Projektion einer Lichtfläche ermittelt wird, deren Intensitätsverteilung punktweise dem Mittelwert von maximaler und minimaler Intensität der Gitterprojektionen mit sinusförmiger Intensitätsverteilung entspricht.

4. Verfahren nach Patentanspruch 1, 2 oder 3 dadurch gekennzeichnet, daß der ortsabhängige Phasenwinkel punktweise aus der Projektion eines Sinusgitters und der Projektion eines hierzu um ein Viertel der Periodenlänge verschobenen Sinusgitters ermittelt wird.

5. Verfahren nach Patentanspruch 1, 2, 3 oder 4 dadurch gekennzeichnet, daß das Verfahren zur Bestimmung der absoluten, nicht 2π modulierten Phasenwinkel mit dem Verfahren des codierten Lichtansatzes kombiniert wird.

6. Verfahren nach Patentanspruch 5 dadurch gekennzeichnet, daß die zur Berechnung der Hintergrundintensität oder Intensitätsamplitude aufgenommenen Abbildungen zugleich zur Identifikation heller und dunkler Streifen in den Streifenbildern des codierten Lichtansatzes verwendet werden.

7. Verfahren nach Patentanspruch 1, 2, 3 oder 4 dadurch gekennzeichnet, daß zur Bestimmung der absoluten Phasenwinkel Gitterprojektionen mit unterschiedlichen Periodenlängen verwendet werden, um eine Serie von Phasenbildern zu erhalten, welche die Berechnung der absoluten, nicht 2π modulierten Phasenwinkel ermöglicht.

8. Verfahren nach Patentanspruch 7 dadurch gekennzeichnet, daß die zur Berechnung der Hintergrundintensität oder Intensitätsamplitude verwendeten Abbildungen genau einmal aufgenommen werden und für die Phasenwinkelberechnung aller benötigten Periodenlängen verwendet werden.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

THIS PAGE BLANK (USPTO)

Fig. 1

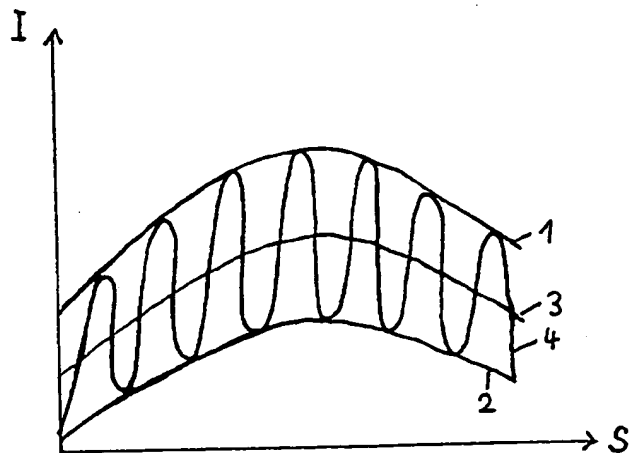
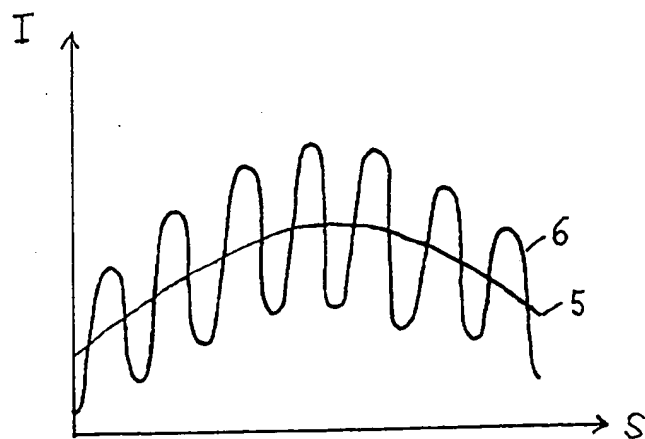


Fig. 2



BEST AVAILABLE COPY

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.